

非平衡流流体力学

俞鸿儒 崔季平

(力学研究所)

一、非平衡流流体力学的主要特征

传统流体力学所研究的流动介质的性质都是比较简单的。例如空气和水的物性,包括粘性、可压缩性、比热等,这些都是以一系列的物性参数出现在流体力学方程之中。又因为这些量大多是固定的,不随流体运动而变化,于是最终可以用一系列与这些物性参数有关的无量纲量来约化问题。经过本世纪的发展,这一类流体力学问题的领域划分,及不同领域中的求解问题已经大致完善,大多有较为成熟的模式。当然,对复杂问题,如复杂边值、分离流动、不定常流及大非线性问题等仍然富有挑战性,有待努力解决。这些问题在非常多的工程领域中,仍然发挥着重要的作用。传统流体力学的进一步发展,要考虑更为复杂的介质,特别是要考虑流体的内部结构与介质内部进行着物理化学变化的流体力学,于是出现了一个全新的领域——非平衡流流体力学。与传统的流体力学相比较,非平衡流流体力学有以下三个主要特征:

(一) 需要考虑介质的内部结构。这种内部结构包括原子与分子微观结构。在广义上也包括那些相对于流体宏观尺度为小,又较原子微观尺度为大的细观结构。对于微观结构,具体说是要考虑原子与分子内态、原子与分子的化合、分解及电离,在一些情况下还要包括辐射场,这些问题使我们必需深入到物质的微观结构作为出发点来考虑。细观结构则是指流体中有异相颗粒的悬浮物、布朗粒子及簇合物等。

(二) 流体流动过程中伴有内部发生的不可逆过程。这些过程包括: 化学反应、电离、内部自由度的激发和弛豫过程、辐射过程、不同相之间的动量与能量交换、传质过程、相界面上的物理化学反应与相变、各种不同耗散机制引发的耗散过程等。

(三) 流体宏观流动的特征时间与流体内部发生的过程特征时间可以相比。这就是说流体外部宏观流动与内部状态变化之间有强烈的耦合效应,不能分开处理。

二、流体力学向非平衡流方面的发展

这种发展与当代工程技术的进步是分不开的。比较明显的例子是航天技术的发展。流体力学在本世纪中最辉煌的成绩之一,是空气动力学的发展为航空工业的发展提供了一个坚实的科学基础。本世纪下半叶人类开始征服空间并开始出现喷气推进与超音速飞行。这对传统的空气动力学出现了新的挑战,其中最重要的问题之一就是要克服极高速下的热障问题。空

气动力学要处理的对象是温度高达几千度到上万度,空气不能当作理想介质,大约有占总数百分之几十的能量要以化学能、内部运动自由度激发和电离的形式存在。重新考察介质性质的变化及其对流动的影响就成为通向航天工程的必经之路。到目前为止,人们虽然对这一问题进行了余 30 年的努力,也取得了重要进展,例如关于弹道式飞行器的气动与防热的进展。但是对于高技术的航天飞行仍然面临着大批科学问题,例如美国航天飞机回地时,水平操纵舵的配平偏角实际值比设计值增加近一倍,表明非平衡现象对气动压心设计的偏差有相当影响。而在气动热的问题上,因为气体热能存在的重要形式是化学反应热,所以正确地估价反应进行的程度与反应率对传热产生的影响,其大小相差可达百分之几十,潜力甚为可观。因此要使航天工程达到象现代航空工程那样有严密科学理论支持而达到完备,还要走相当的路程,其中最为重要的是靠非平衡流体力学的发展。可以举出的第二个例子是气体流动激光器的出现,这一技术可以认为是非平衡流体力学的一个直接的应用。60 年代激光现象的原理被阐明之后,首先是由那些非平衡流方面有重要贡献的科学家从原理上提出来这一技术设想,即通过对流体混合运动过程与化学反应及内态激发过程加以协调,把气流介质的化学能或内部自由度激发能定向地转化为激光能。这一理论设想很快得到技术上的实现,成为目前保持连续输出而具有最大功率的唯一现实的途径。可以说,所有高能激光体系中,介质均必须高速流动,非平衡流均在其中起核心作用。

三、非平衡流体力学发展展望

(一) 我们认为首先得到发展的是与高超声速飞行有关的非平衡流的研究。作为空气动力学的延伸,在高速下必须考虑分子的内态变化和化学反应,这样就出现了一般空气动力学中的尺度律的失效。在实验工作上要发展全新的模拟方法;在理论上则要求解决对内态变化、反应过程和流体力学三者间耦合所带来的新的定量上的困难,以及需要对高温下气体分子的解离、化学反应、电离与辐射所产生的流体物理现象重新加以认识。这些都是航天技术要得到发展必需解决的基础性问题。国际学术界的普遍看法是,这方面虽然过去取得了进展,但是其重要意义却长期被忽视,许多重要问题远未得到解决,必须在今后加以重视。

(二) 具有细观结构的非平衡流体力学将要受到重视。过去多相介质的流体力学的发展大多是用实用的模型简化方法,未能从非平衡的角度上加以深化。实际上从有细观结构的非平衡流角度出发,将会把这个领域的研究提升成为一门严密科学。从本质上看,有细观结构的流体运动其内部运动是非定常的、非平衡的,是一种非确定性问题而带有统计描述性质的。然而这种细观结构的非平衡流动的应用性又是非常强的。除了传统的化工项目与矿山技术的流态化以及雾化、粉尘等之外,一些现代新技术,如高超声速喷管非平衡的异相凝结技术,微粉体工业与微晶的制备技术,气溶胶技术及微粉体分离技术等,这些技术领域都需要有坚实的流体力学理论的指导。在这方面我们也可以举出非平衡流理论的应用背景,这就是研究了非平衡的蒸发与凝结,它是长久以来高速气体动力学感兴趣的问题。在过去的几年里,用高超声速喷管流使气体定向地凝结成簇合体,对研究相变动力学和对自然与宇宙中的许多自然现象的了解都提供了启示。这一成功对定向合成微细材料也有潜在的价值。

(三) 最后应当提出的是化学反应流。化学反应介质流动问题的理论方法是 Vonkarman

和 Landau 首先针对燃烧现象提出来的。我国在 50 年代末由钱学森倡导为化学流体力学。但是作为非平衡流体力学来发展则是更进了一步。这首先是化学方面的研究,对于化学动力学的了解与定量化比以前更深入,提供了新的基础。现在已经达到对介质内部过程有更为细致的了解,特别是对反应动力学常数和机理的了解,使我们可以更为具体地评估内部过程与流体流动过程的各自的含义及对一些宏观结果给以定量解释。其中最重要的进展例子就是后混合化学流动激光器的应用,已经能够完全应用流体力学与化学动力学的理论模型和模拟计算来实现其理论预见性。对于一般的化学工程与能源工程来说,传统的工程方法仍然占着统治地位。但是已经出现了社会上的新的要求和挑战,例如,人类对于能源的不合理利用造成了环境污染,大批的废料处理及工业化带来的火灾与爆炸灾害等,已经引起全球性的舆论,这些问题亟待解决。在这一方面从非平衡化学反应流的角度对一些带有基础性的问题进行研究是必不可少的。在这个领域里将会形成一个新的国际性研究高潮。与这一情况形成对照的是一些新兴技术的出现,例如等离子体化工与化学气相沉积(CVD)材料技术,很明显属于在一个流动系统中有化学反应及传质的问题,一方面是进行着内部的物理化学过程,一方面是宏观流动过程。这也是非平衡流需要发挥作用以促使其发展成工业的一个场合。

我们认为非平衡流是流体力学向深入发展的一个重要领域,它一方面是流体力学与物理学、化学的交叉、结合,另一方面又是流体力学走向微观化的一个发展。它已经有比较成功的过去,也面临着许多新的挑战。展望未来,可以肯定的是,许多社会发展的需要将要促使它有更多的进步,反过来它也将会对未来的社会进步做出应有的贡献。